

---

# *Predicción de las propiedades mecánicas en fundiciones grises de baja aleación*

Lázaro Pino Rivero\*, Rafael Quintana Puchol, Amado Cruz Crespo.

Universidad Central «Marta Abreu» de las Villas, Carretera a Camajuaní, km 5 1/2, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

---

*Predicting the mechanical properties in low-alloy cast iron*

*Predicció de les propietats mecàniques en foneries grises de baix aliatge*

*Recibido: 9 de abril de 2008; revisado: 26 de mayo de 2008; aceptado: 6 de junio de 2008*

## RESUMEN

Se presenta en este artículo un ejemplo de la predicción de las propiedades mecánicas, resistencia al impacto y resistencia a la tracción, a partir de la microdureza de la matriz, en un grupo de fundiciones aleadas en las cuales generalmente se presenta grafito laminar recto y/o carburo. Se establecen las expresiones que permiten el cálculo y se demuestra que tanto la resistencia como la tenacidad, en este tipo de aleaciones ferrosas, tienen una misma tendencia, debido a que la ruptura del material ocurre sin deformación plástica, debido a la presencia de grafito en la microestructura.

**Palabras clave:** Resistencia a la tracción. Resistencia al impacto. Deformación plástica. Deformación elástica. Fundición gris. Grafito laminar recto.

## SUMMARY

In this paper is shown an example of the prediction of the mechanical properties, such as impact and tensile resistance, using for this purpose the microhardness of the matrix of a group of alloyed cast iron with lamellar graphite and/or carbides. The expressions that allow to do this calculation are presented and it is demonstrated that the resistance as the tenacity, in this type of ferrous alloys have the same tendency, because the rupture of the mate-

rial happens without plastic deformation, due to the graphite presence.

**Key words:** Tensile strength. Impact resistance. Plastic deformation. Elastic deformation. Gray cast iron. Straight lamellar graphite.

## RESUM

Es presenta, en aquest treball, un exemple de la predicció de les propietats mecàniques, resistència a l'impacte i resistència a la tracció, a partir de la microdureza de la matriu, en un grup de foneries d'aliatges en les que generalment es presenta grafit laminar recte i/o carbur. S'estableixen les expressions que permeten el càlcul i es demostra que tant la resistència com la tenacitat en aquest tipus d'aliatges ferrosos tenen una mateixa tendència, donat que la ruptura del material succeeix sense deformació plàstica com a resultat de la presència de grafit en la microestructura.

**Mots clau:** Resistència a la tracció. Resistència a l'impacte. Deformació plàstica. Deformació elàstica. Foneria gris. Grafit laminar recte.

---

\* E-mail: lazaro@uclv.edu.cu

## 1. INTRODUCCIÓN

Al observar la estructura metalográfica de una fundición gris aleada, se distingue en ella: una matriz, la cual puede ser ferrítica, perlítica o una mezcla de ambas, así como también puede observarse una de las estructuras de no equilibrio como las aciculares o las martensíticas, en este último caso es común que quede alguna austenita residual durante los procesos de transformación que ocurren durante el enfriamiento del metal. Otra estructura que aparece es el grafito, el cual puede presentarse en diferentes formas: laminar, esferoidal, vermicular o nodular. En las llamadas fundiciones moteadas, también puede aparecer determinada cantidad de carburos, producto a una velocidad de enfriamiento muy rápida o a la presencia de elementos que favorecen su presencia<sup>(1, 2 y 3)</sup>.

En el caso de las fundiciones grises con grafito laminar, esta estructura se comporta de modo similar al de las grietas en una matriz de un acero, por lo que las propiedades mecánicas de las fundiciones se ven afectadas, respecto a las que muestran las mismas matrices en los aceros<sup>(4)</sup>.

El hierro fundido gris presenta una estructura cristalina, en la que en los nodos de la red se sitúan los cationes del metal, rodeados por una nube electrónica deslocalizada; como consecuencia de ello en los metales se muestran las propiedades de deformación plástica y elástica<sup>(5)</sup>.

La presencia del carbono en forma de grafito en las fundiciones, especialmente el grafito laminar, provoca al aplicarle una carga de tensión al material, que la deformación ocurra de modo elástico y con escasa deformación plástica, razón por la cual la ruptura del material ocurre a más bajas cargas que en los aceros; ya que las láminas de grafito, como ya se dijo anteriormente, se comportan como grietas dentro de la matriz similar a las de un acero. Es por ello que la forma del grafito y su distribución en las fundiciones tiene una influencia decisiva en los valores máximos de tensión necesarios para que ocurra la ruptura del material ( $\sigma_b$ ).

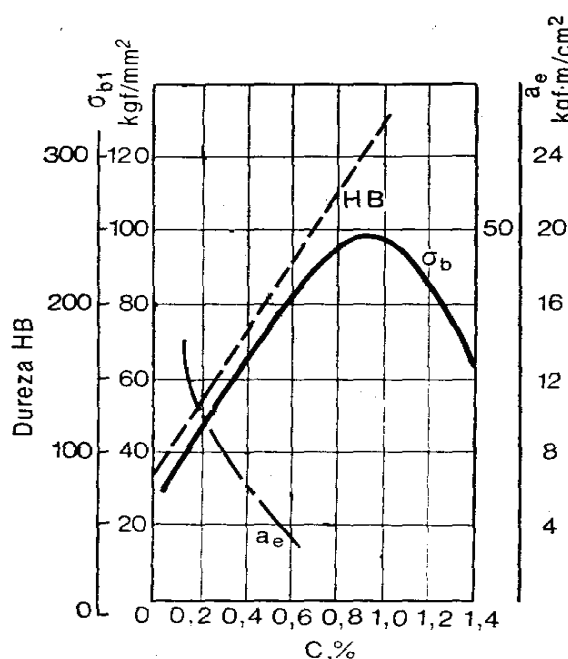


Figura 1. El incremento del contenido de carbono en un acero provoca un incremento en la dureza (HB), un aumento de la resistencia a la tracción ( $\sigma_b$ ) y una disminución de la resiliencia ( $a_e$ ). (tomado de Metalografía Tomo I, A.P. Guliaev).

Por todo lo explicado se prefiere un grafito esferoidal a uno laminar, cuando se requiere un material con mejores propiedades mecánicas, lográndose en muchos casos valores muy cercanos a los que exhiben los aceros, ya que la forma esférica del grafito no provoca la formación de una grieta como en el grafito laminar, la cual se propaga rápidamente al aplicar una fuerza de tensión.

En el propio grafito laminar se prefiere que sea tipo A, de tamaño medio y que las inclusiones sean finas; a uno tipo D, lo cual se explica debido a que existe una estrecha relación entre la forma y tamaño de la celda eutéctica y la forma y distribución del grafito que se forma dentro de dicha celda<sup>(4)</sup>.

Guliaev<sup>(6)</sup> refiriéndose al acero señala que el módulo de elasticidad, relación entre la tensión aplicada ( $\sigma$ ) y la deformación que provoca en el metal ( $\epsilon$ ); no es sensible a los cambios de estructura en el material. En los aceros donde la mayoría de la energía disipada en la fractura es resultado de una deformación plástica, la mayor tenacidad se muestra en los materiales más dúctiles y de menor resistencia a la tracción. En la figura 1 se muestra como al incrementarse el contenido de carbono en un acero al carbono, disminuye la resiliencia, se incrementa su dureza. Sin embargo al incrementarse la dureza también lo hace su resistencia a la tracción, como se observa en la propia figura.

En línea general en las aleaciones ferrosas según se incrementa la dureza, también aumenta la resistencia a la tracción, como se observa en la figura 2. Sin embargo no ocurre lo mismo con la resistencia al impacto o resiliencia; por ejemplo en las fundiciones grises, en las cuales no es apreciable la deformación plástica, debido a la presencia del grafito, la fractura ocurre con muy poca deformación plástica y la mayor cantidad de la energía absorbida es elástica. Este comportamiento explica el por qué en este tipo de materiales existe una tendencia similar en el comportamiento entre la resistencia al impacto y a la tracción, a diferencia de lo que ocurre en los aceros.

## 2. DESARROLLO

En este artículo se hace un estudio de lo que ocurre con tres propiedades mecánicas, en un grupo de aleaciones de hierro fundido con grafito laminar; las cuales fueron obtenidas por aleación en cuchara a partir de un metal fundido en un horno de inducción de frecuencia media y dos toneladas de capacidad. La composición química de dichas aleaciones presentan las mismas cantidades reportadas para los elementos químicos, carbono, azufre, fósforo y silicio, pues proceden del mismo metal base (Tabla 1).

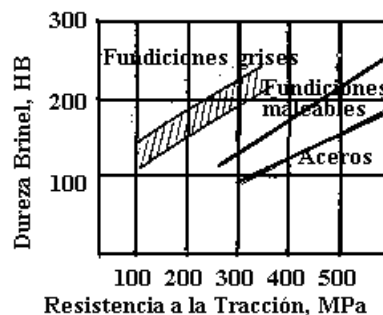


Figura 2. En los metales existe generalmente una relación directa entre la variación de la resistencia a la tracción y la dureza. (tomado de Apraiz Barreiro).

**TABLA I**

**Composición de los elementos que no varía en las aleaciones estudiadas.**

% C	% Si	% P	% S
3.2	2.1	0.2	0.08

Mientras que las cantidades de los elementos de aleación manganeso, cromo, níquel, molibdeno y cobre son variables según se observa en la tabla 2. Es importante resaltar que todas las aleaciones estudiadas tienen en común, que la suma de estos elementos es 5,15 %; lo cual las sitúa en el intervalo entre las de bajo y alto nivel de aleación.

A cada aleación se le midieron la resistencia a la tracción (MPa), la resistencia al impacto (J) y la microdureza de la matriz (HV). Para realizar la mediciones de estas propiedades mecánicas fueron confeccionadas probetas cilíndricas de 30 mm de diámetro y 500 mm de alto, obtenidas en moldes de arenas, según la ISO Recommendation R 187<sup>(7)</sup>, donde la velocidad de enfriamiento es lenta y por lo tanto se evita que el efecto de la velocidad del enfriamiento solape el efecto de los elementos de aleación sobre las transformaciones sufridas en el hierro fundido durante el enfriamiento.

**TABLA II**

**Variación del contenido de los elementos de aleación en las muestras analizadas.**

Elemento	Contenido, %
Manganeso	0,5-1,5
Cromo	0,3-1,5
Molibdeno	0 -1,0
Níquel	1,0-2,5
Cobre	0,5-1,5

La resistencia a la tracción se midió en una prensa universal modelo ZD40, empleando la probeta corta, propuesta en la ISO Recommendation R 187. El método de medición asumido concuerda con el reportado por la UNE 36-111-73<sup>(8)</sup> y la ASTM A-48-94. Los valores obtenidos para esta magnitud se reportan en la tabla 3.

Por su parte la resistencia al impacto se midió empleando un péndulo Charpy con capacidad para 149 J, del tipo UT-30 y la probeta utilizada es la recomendada por la norma ASTM A 327-91 E 23<sup>(9)</sup>, es decir una probeta cilíndrica sin entalla, pues la estructura de las aleaciones presenta grafito laminar, el cual como ya se dijo se comporta como grietas en la matriz. Los valores obtenidos al medir esta propiedad en las muestras estudiadas se reportan en la tabla 3.

Resulta de interés particular en el desarrollo de este estudio, conocer las estructuras presentes en estas aleaciones, pues como se conoce existe una relación en los materiales de ingeniería, entre la composición química, las estructuras y sus propiedades. Por esta razón se efectuó un estudio de las estructuras metalográficas de las muestras, las cuales previamente fueron preparadas de modo tradicional mediante desbaste, pulido y ataque con nital al 1 %, así como adicionalmente se verificaron las fases presentes mediante difracción de rayos X.

En la caracterización de las matrices se empleó adicionalmente la medición de la microdureza, utilizando para

ello un microdurómetro Vicker. La medición se siguió teniendo en cuenta lo orientado en la NC 04-11:72<sup>(10)</sup> y los resultados obtenidos se reportan en la tabla 3.

En las figuras 3 y 4 se muestra una de las estructuras presentes en las aleaciones estudiadas, en la cual se aprecia grafito laminar recto, distribuido uniformemente, empleando para ello un aumento de 100X y una matriz acicular a un aumento de 500X.

En la figura 5 representa a otro grupo de aleaciones, en la que se puede apreciar grafito laminar recto, distribuido uniformemente a 100X y una matriz perlítica y carburos observados en la imagen a 500 X. Estas fases fueron comprobadas adicionalmente mediante el empleo de la difracción de rayos X. El difractograma muestra la presencia de grafito, ferrita y cementita. Como es conocido la perlita es una mezcla mecánica formada por ferrita y cementita secundaria.

En otra de muestra correspondiente a otro grupo de aleaciones, cuya microestructura aparece representada en la

**TABLA III**

**Microdureza de las matrices de las aleaciones estudiadas, su resistencia a la tracción y al impacto.**

Microdureza HV	R Tracción MPa	R Impacto J
435	235	27
525	255	41
502	243	38
534	270	36
500	271	33
600	312	44
633	318	49
581	283	49
444	237	32
630	319	51
445	240	28
520	260	39
510	245	37
541	271	36
505	268	36
469	235	32
576	291	46
555	275	38
601	302	43
490	247	30
620	311	52
552	291	45
452	233	29
520	258	38
545	265	35
515	278	34

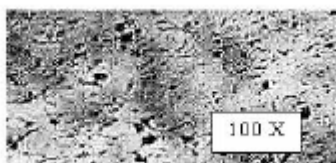


Figura 3. Grafito laminar recto, distribuido uniformemente y tamaño 30-60  $\mu\text{m}$ .

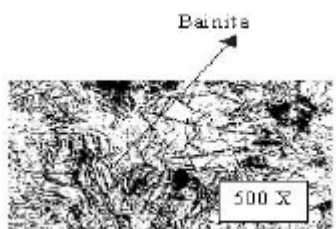


Figura 4. Aleación con matriz bainítica.

figura 6, se observan las estructuras perlita y cementita, mientras que las fases, ferrita, cementita, así como es apreciable la presencia de martensita y austenita residual, lo que explica los elevados valores reportados para la microdureza de la matriz en este tipo de aleación. Es de destacar que en este tipo de aleaciones es prácticamente imperceptible la presencia de grafito, dado el predominio de elementos no grafitizantes (Cr, Mn y Mo), sobre las cantidades de los elementos grafitizantes en su composición química (Si, Ni y Cu). Aunque como se mencionó el contenido de silicio y carbono es idéntico en todas las aleaciones, debido al método de obtención empleado.

Por su parte en la figura 8, se muestran las estructuras metalográficas presentes en otro tipo de aleaciones, en la

misma se destaca la martensita y carburos, así como grafito laminar recto, distribuido uniformemente. Al realizar la caracterización mediante difracción de rayos X, se apreció la presencia de martensita, austenita residual y de cementita.

En la figura 7 aparece una estructura típica de un hierro blanco, donde se aprecia perlita, martensita y austenita residual, así como carburos primarios, estructuras verificadas mediante difracción de rayos X.

En otro tipo de aleación, figura 8, se aprecia la presencia de martensita y grafito laminar recto, distribuido uniformemente, estas fases fueron corroboradas por difracción de rayos X. Resulta de interés en este tipo de aleaciones que no hay presencia de carburos primarios y si abundante grafito.

Los resultados más elevados de la microdureza de las matrices coinciden con las matrices martensíticas, le siguen las matrices bainíticas y los valores inferiores corresponden con las matrices perlíticas y dentro de ellas se observa una variación correspondiente al grado de dispersión de la estructura, debido al efecto de los elementos de aleación y a la combinación de la perlita con martensita y austenita residual.

Al efectuar el análisis de regresión de la macrodureza de las matrices con la resistencia a la tracción y al impacto, se obtuvieron los resultados que se muestran en la figura 9. Se observa en ambas gráficas que existe una correspondencia lineal entre dichas propiedades y la microdureza de las matrices. En ambos casos los mejores resultados observados en dichas propiedades se corresponden con las matrices con mayor microdureza, lo cual demuestra que en ambos casos las propiedades en los hierros grises aleados, con grafito laminar, tienen la misma tendencia, lo que se explica porque la naturaleza de la fractura en ambos ensayos tiene una misma naturaleza, es decir ocurre como se señaló en la introducción, con muy poca deformación plástica. Esto no ocurre en los aceros donde los materiales más dúctiles son los que exhiben mejor tenacidad, aunque son menos resistentes.

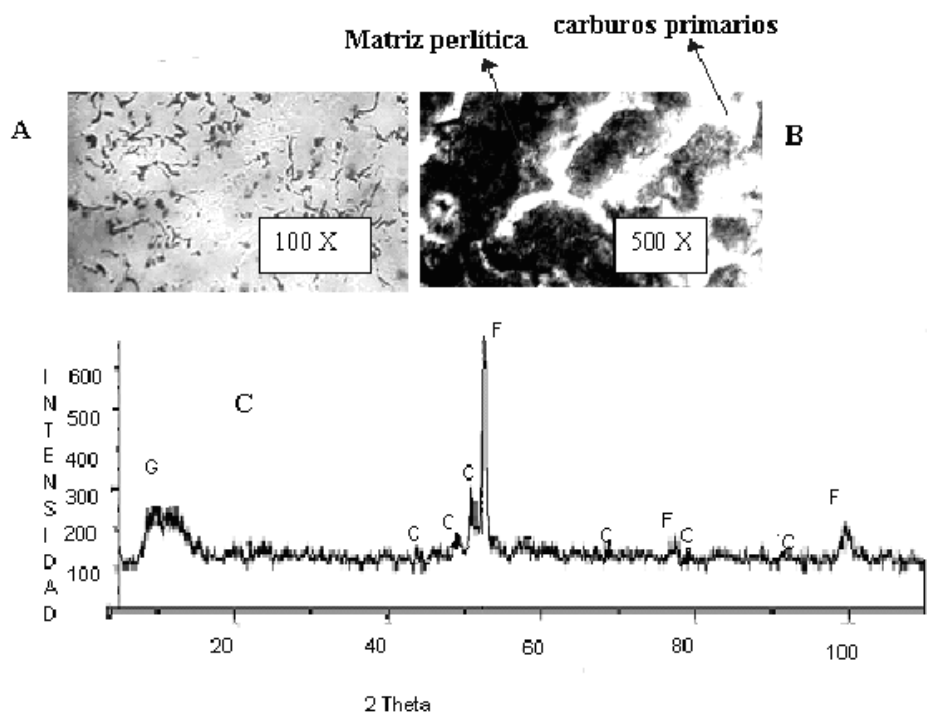
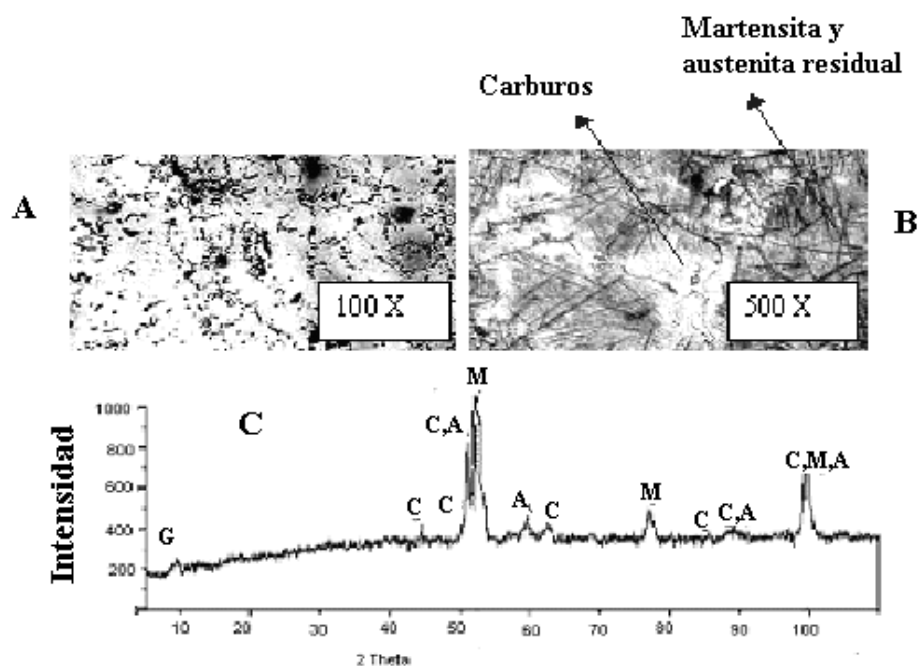
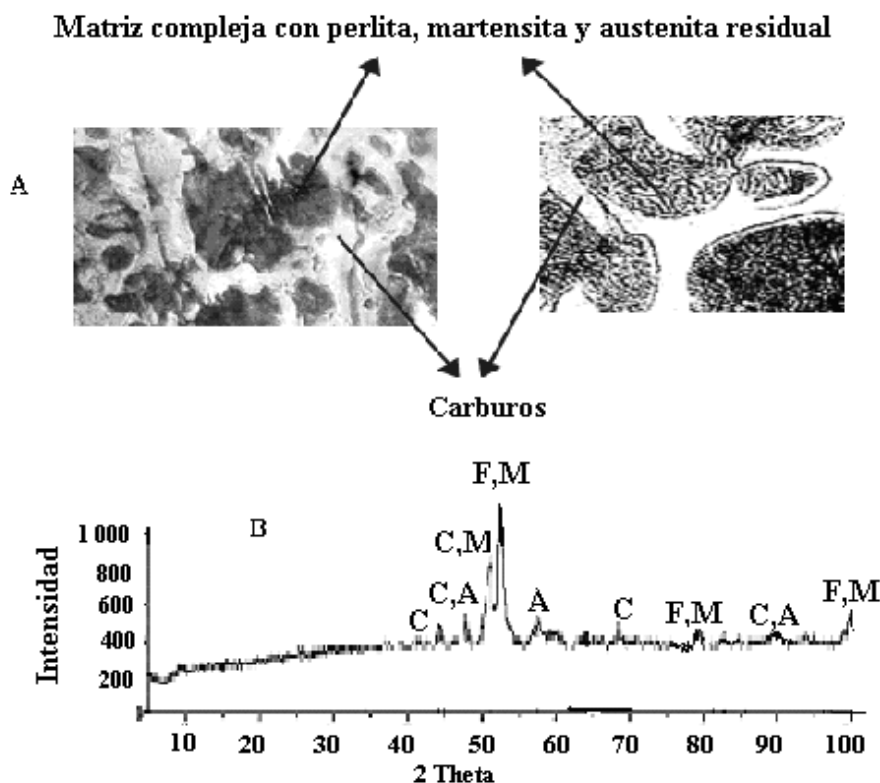


Figura 5. A) Se observa la presencia de grafito laminar recto, distribuido uniformemente y con tamaño entre 30-60  $\mu\text{m}$  (100 X). B) Matriz perlítica y carburos primarios (500 X). C) En el difractograma se observan las fases: G (grafito), C (cementita) y F (ferrita), corroborando las observaciones metalográficas de las figuras A y B.



**Figura 6. A) En la imagen se aprecia la presencia de grafito laminar recto, distribuido**

**Figura 6. A) En la imagen se aprecia la presencia de grafito laminar recto, distribuido uniformemente, con tamaño entre 30-60  $\mu\text{m}$  a 100 X. B) Matriz martensítica, austenita residual y carburos primarios a 500 X). C) En el difractograma se verifican las estructuras observadas metalográficamente: G (grafito), C (carburos primarios), M (martensita y A (austenita).**



**Figura 7. A) Aleaciones con matriz compleja formada por perlita, martensita y austenita residual, donde además se observan carburos primarios, lo cual queda corroborado en el difractograma B) donde C (cementita), M (martensita), A (austenita) y F (ferrita).**



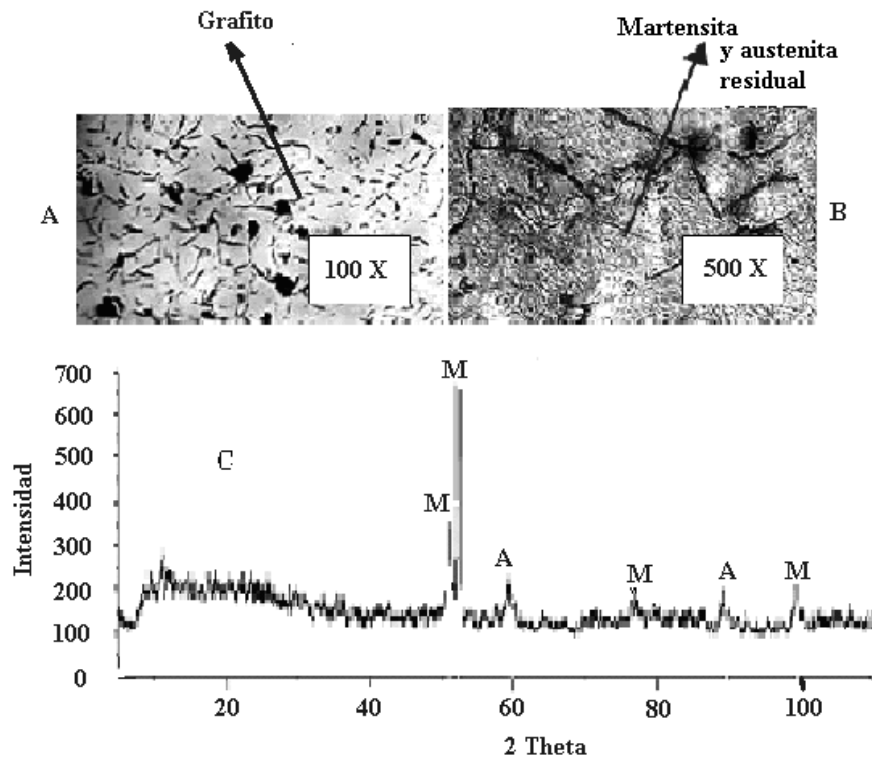


Figura 8. Se observa grafito laminar recto distribuido uniformemente en A y una matriz martensítica con austenita residual en B, estructuras que se verifican en el difractograma en C), donde: A (austenita) y M (martensita).

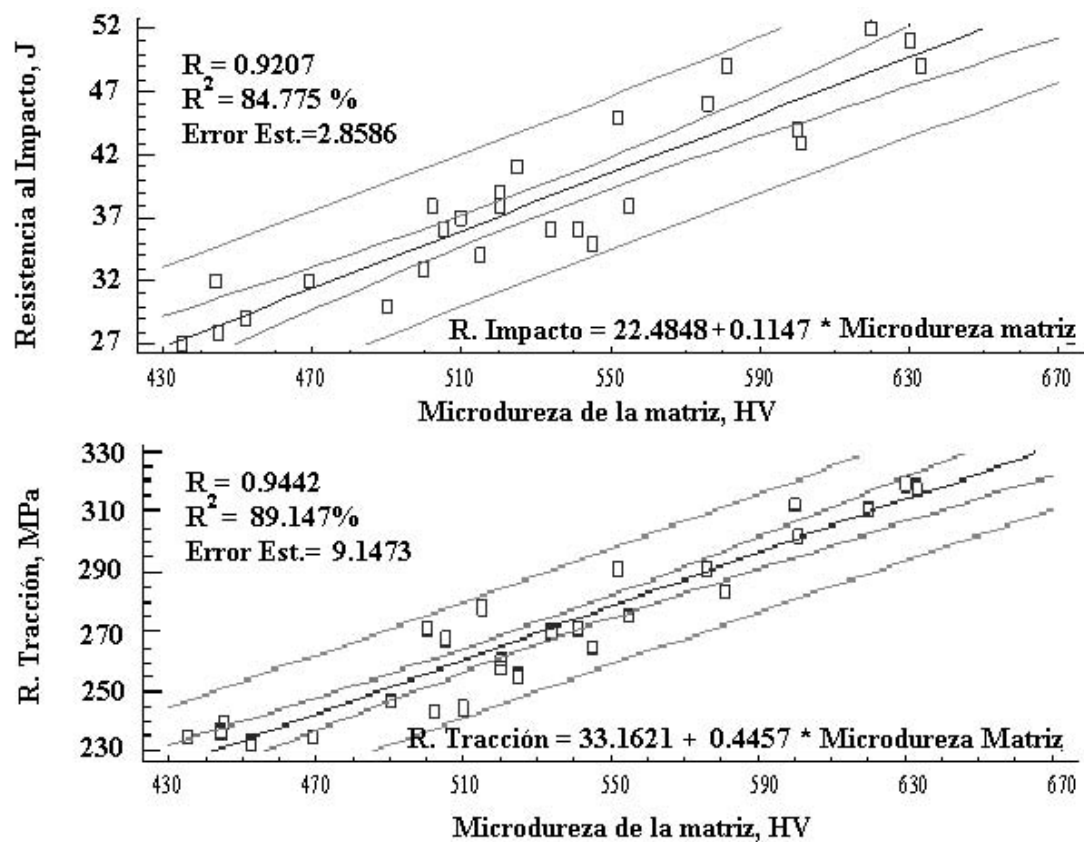


Figura 9. Gráficos de correlación entre las propiedades resistencia a la tracción y al impacto con la microdureza las aleaciones.

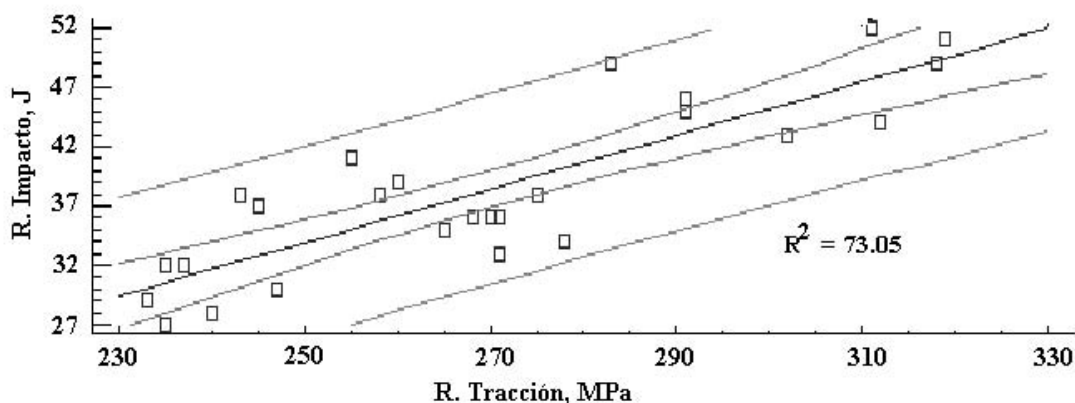


Figura 10. Ambas propiedades mecánicas presentan una misma tendencia y un elevado nivel de correlación.

Teniendo en cuenta los análisis de regresión realizados, se pueden establecer las siguientes ecuaciones:

$$RI = -22.4848 + 0.114682 * HV$$

$$RT = 33.1621 + 0.445709 * HV$$

Donde: RT representa la resistencia a la tracción, expresada en MPa, RI representa la resistencia al impacto, expresada en J y HV la microdureza de la matriz, expresada en HV. En la figura 10 se muestra como ambas propiedades muestran entre sí un alto grado de correlación, lo que confirma que en los hierros grises aleados con presencia de grafito laminar, tanto la resistencia como la tenacidad muestran una misma tendencia, lo cual es evidencia de que la fractura en ambos ensayos ocurre a costa de la energía involucrada en la deformación elástica, como es conocido.

## CONCLUSIONES

1. En las fundiciones grises aleadas con grafito laminar, la presencia de carburos y diferentes tipos de matrices; tanto la resistencia a la tracción como al impacto, tienen una misma tendencia y dependen de la energía absorbida durante la fractura, la cual ocurre a expensas de la deformación elástica.
2. La tenacidad y la resistencia en los hierros fundidos aleados del sistema estudiado, con grafito laminar recto, tienen una relación directa con la microdureza de las matrices, debido a la naturaleza de la fractura durante la realización de ambos ensayos; por lo que se pueden establecer las siguientes ecuaciones:

$$RI = -22.4848 + 0.114682 * HV$$

$$RT = 33.1621 + 0.445709 * HV$$

Donde HV representa la microdureza Vickers de las matrices.

## BIBLIOGRAFÍA

- (1). AFS. Iron Casting Handbook. Iron Casting Society, Inc. 1982.
- (2). Askeland, D. «La Ciencia e Ingeniería de los Materiales». Grupo Editorial Iberoamericana, México, 1991.
- (3). ASTM A-536. Clasificación del Grafito en hierro gris., 1987.
- (4). ASTM A-48-94<sup>a</sup>, Pág. 17. Standard specification for gray irons castings. Volume 01-02. 1995.
- (5). Avner, S.H. Introducción a la metalurgia física. Ed. Mc. Graw-Hill, 2a. edición, 1990.
- (6). Guliaev, A.P. Metalografía. 2da ed. Rev. y Ampl. Traducido del Ruso por Antonio Molina García. MIR. Moscú, 1983.
- (7). ISO Recommendation R185. Clasification of Grey Cast Iron. 1st Edition, November 1961.
- (8). UNE 36-111-73 Fundición Gris. Tipos, características y condiciones de suministros de piezas, 1973.
- (9). ASTM A327-91 E23. Methods for notched Bar Impact. Testing of Metallic Material, 1991.
- (10). NC 04-11:72. Ensayo de la dureza Vickers en materiales metálicos.